





**METHOD FOR TRIGGERING A GAS INSULATED SWITCHING SPARK GAP AND DEVICE USING SAID METHOD**

**Patent number:** EP0979548  
**Publication date:** 2000-02-16  
**Inventor:** BLUHM HANSJOACHIM (DE); FREY WOLFGANG (DE)  
**Applicant:** KARLSRUHE FORSCHZENT (DE)  
**Classification:**  
- **international:** **H01T2/00; H01T2/00;** (IPC1-7): H01T2/00  
- **european:** H01T2/00  
**Application number:** EP19980919199 19980401  
**Priority number(s):** DE19971018660 19970502; WO1998EP01877 19980401

**Also published as:**

 WO9850990 (A1)  
 EP0979548 (A0)  
 DE19718660 (A1)  
 EP0979548 (B1)

**Report a data error here**

Abstract not available for EP0979548

Abstract of correspondent: **DE19718660**

The invention relates to a method for triggering a gas insulated switching spark gap and to the spark gap itself. Triggering requires only a small amount of energy using a coherently or incoherently scattering, triggering light source illuminating the gap between the electrodes. The triggering light source releases electrons from the metal particles present in the insulating gas of the switching spark gap. Said electrons are used as starting electrons to form sparking conduits. The metal aerosol is produced in a spark gap, an aerosol generator, with electrodes made from said metal aerosol material. One of the constituents of the insulating gas flows through the aerosol generator. The insulating gas in the switching spark gap consists of at least one constituent.

---

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide

(19)



Europäisches Patentamt  
European Patent Office  
Office européen des brevets



(11)

EP 0 979 548 B1

(12)

## EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des  
Hinweises auf die Patenterteilung:  
14.03.2001 Patentblatt 2001/11

(51) Int Cl.7: H01T 2/00

(86) Internationale Anmeldenummer:  
PCT/EP98/01877

(21) Anmeldenummer: 98919199.4

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:  
WO 98/50990 [12.11.1998 Gazette 1998/45]

(22) Anmeldetag: 01.04.1998

(54) VERFAHREN ZUR TRIGGERUNG EINER GASISOLIERTEN SCHALTSTRECKE UND  
VORRICHTUNG ZUR ANWENDUNG DES VERFAHRENS

METHOD FOR TRIGGERING A GAS INSULATED SWITCHING SPARK GAP AND DEVICE USING  
SAID METHOD

PROCEDE D'AMOR AGE D'UN ECLATEUR DE COMMUTATION ISOLE PAR GAZ ET DISPOSITIF  
PERMETTANT DE METTRE LEDIT PROCEDE EN OEUVRE

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
DE FR GB

(56) Entgegenhaltungen:  
US-A- 4 604 554 US-A- 4 978 893

(30) Priorität: 02.05.1997 DE 19718660

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
16.02.2000 Patentblatt 2000/07

(73) Patentinhaber: Forschungszentrum Karlsruhe  
GmbH  
76133 Karlsruhe (DE)

(72) Erfinder:

- BLUHM, Hansjoachim  
D-76297 Stutensee (DE)
- FREY, Wolfgang  
D-76137 Karlsruhe (DE)

- FREY W ET AL: "Laser-triggered rail-gap switches with seed-electron generation by photoemission from metal aerosol particles" NINTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, GRAZ, AUSTRIA, 28 AUG.-1 SEPT. 1995, Seiten 7931/1-2 vol.7, XP002074288 1995, Graz, Austria, Inst. High Voltage Eng, Austria
- FREY W: "Niederenergetische Lasertriggerung von Schaltfunkenstrecken mit Metall-Aerosol-Schaltgasen" ELEKTRIE, 1997, DR. HEIDE & PARTNER, GERMANY, Bd. 51, Nr. 2, Seiten 53-55, XP000735993 ISSN 0013-5399
- PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 013, no. 304 (E-786), 12. Juli 1989 & JP 01 081185 A (HITACHI LTD), 27. März 1989 in der Anmeldung erwähnt

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

## Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Triggereung einer Schaltfunkenstrecke und eine Schaltfunkenstrecke, die gemäß dem Verfahren betrieben wird und als Gleichspannungsschalter oder als dynamisch beanspruchter Schalter verwendet wird.

[0002] Das Ziel ist für Hochspannungsentladungen bei den verschiedensten Prozessen einen Schalter zur Verfügung zu haben, der zu einem vorbestimmten Zeitpunkt zuverlässig in den leitenden Zustand überführbar ist. Hierzu ist eine Lösung bekannt, bei der dem Isoliergas in der Funkenstreckenkammer leicht photoionisierbare, gasförmige Additive (Fluorbenzene) beigemischt werden, die dann durch Bestrahlen mit einer Lichtquelle geeigneter Wellenlänge über Photoionisation die Startelektronen für die Ausbildung des Zündkanals freisetzen (siehe Dougal, R. A. et al.: "Fundamental Processes in Laser-Triggered Electrical Breakdown of Gases", J. Appl. Phys., Vol. 17 (1984), p. 903 - 918, printed in Great Britain).

[0003] Als Lichtquellen, die die Funkenstrecke in den leitenden Zustand versetzen, sog. Triggerlichtquellen, haben sich inkohärente Lichtquellen wie UV-Strahler oder kohärente Lichtquellen wie Laser bewährt. Letzteres ist unter dem Begriff Lasertriggierung bekannt.

[0004] Aus der JP 1-81 185 A ist ein Verfahren zur Triggereung einer Schaltfunkenstrecke und eine entsprechende Vorrichtung bekannt. Dabei wird ein Funkenlichtbogen zwischen den Elektroden 6 und 1 durch Teilausleuchtung des Zwischenraumes zwischen den Elektroden mit einer Lichtquelle 14 vorbestimmter Wellenlänge ein ionisierter Metalldampf erzeugt.

[0005] Aus der US 4,604,554 ist eine Vorrichtung mit lichtgetriggertem Schaltfunkenstrecke bekannt. Eine Hilfsfunkenstrecke G5 bewirkt ultraviolette Strahlung, die eine Triggerfunkenstrecke G4 zündet, die wiederum zur Zündung der Schaltfunkenstrecke G1 führt.

[0006] Mit der Lasertriggierung wird die zeitlich gezielte Auflösung eines elektrischen Durchschlags in einer Funkenstrecke durch die Bestrahlung des Elektrodenzwischenraums bzw. der Elektrodenoberfläche mit Laserlicht erreicht. Die zur Triggereung der Funkenstrecke erforderliche Laserenergie hängt vom ausgenutzten Mechanismus der photoelektrischen Ladungsträgererzeugung und von der Betriebsart der Funkenstrecke ab.

[0007] Grundsätzlich wird zwischen dynamisch beanspruchten Schaltern und Gleichspannungsschaltern unterschieden. An Gleichspannungsschaltern liegt die zu isolierende Spannung vor der Triggereung der Funkenstrecke ständig an. Ein elektrischer Durchschlag in einer gasisolierten Homogenfeldanordnung kann nur erfolgen, wenn der effektive Stoßionisationskoeffizient  $\alpha_{eff}$  im Gas größer Null ist und folglich eine lawinenartige Vermehrung freibeweglicher Ladungsträger infolge der Stoßionisation stattfinden kann. Bei Feldstärken kleiner der statischen Durchbruchfeldstärke gilt  $\alpha_{eff} \leq 0$ . Da der Gleichspannungsschalter vor dem Triggerereignis si-

cher isolieren soll, muß seine Betriebsspannung unter seiner statischen Durchbruchspannung  $U_{DC}$  liegen.

[0008] Die Ionisierungsenergie von Gasatomen liegt oberhalb von  $W_i = 12$  eV und ist damit wesentlich größer als die Photonenenergie der Laserstrahlung, die je nach Wellenlänge des Lasers kleiner als  $W_{ph} = 4 \dots 5$  eV ist. Die freibeweglichen Ladungsträger des Plasmas können folglich nur durch eine gleichzeitige Absorption mehrerer Photonen, durch die sogenannte Multiphotonenionisation (MPI) erzeugt werden (siehe Grey Morgan, C.: "Laser-Induced Breakdown of Gases", Rep. Prog. Phys., Vol. 38, 1975, p. 621 - 665).

[0009] Die Multiphotonenionisation ist ein stark nichtlinearer Effekt, der erst bei hohen Bestrahlungsstärken in Erscheinung tritt. Zur Erzeugung eines leitfähigen Plasmas, das eine zur Triggereung eines Gleichspannungsschalters ausreichende Ladungsträgerdichten von  $n > 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  besitzt (Dougal, R. A. et al.: "Fundamental Processes in the Laser-Triggered Electrical Breakdown of Gases", J. Appl. Phys., Vol. 60, No. 12, 1986, p. 4240 - 4247), liegt die erforderliche Bestrahlungsstärke bei  $I = 1 \text{ GW cm}^{-2}$ . Sie ist nur mit einer Fokussierung des Laserstrahls im Elektrodenzwischenraum zu erreichen. Die erforderlichen Laserenergien betragen  $W > 100 \text{ mJ}$ .

[0010] Wird der Laserstrahl auf die Elektrodenoberfläche fokussiert sind die Triggerenergien etwa eine Größenordnung geringer als bei einer Fokussierung im Gasvolumen zwischen den Elektroden. Die erforderliche Laserenergie liegt bei  $W = 10 \text{ mJ}$  (siehe Dougal, R. A. et al.: "Fundamental Processes in Laser-Triggered Electrical Breakdown of Gases", J. Appl. Phys., Vol. 17 (1984), p. 903 - 918). Verdampftes Metall aus Elektrodenmaterial erhöht hier die Leitfähigkeit des Plasmas. Zusätzlich werden freibewegliche Elektronen durch Photoemission aus der Elektrodenoberfläche ausgelöst.

[0011] In der Pulsed-Power-Technik und bei nahezu allen kurzzeitphysikalischen Anwendungen werden die Schaltfunkenstrecken mit impulsförmigen Spannungen  $u(t)$  beaufschlagt und somit dynamisch beansprucht. Zur Triggereung dynamisch beanspruchter Schalter ist der Energieaufwand geringer. Die Spannung am Schalter überschreitet die statische Durchbruchspannung sehr rasch. Die Funkenstrecke bricht bei vergleichsweise hohen Feldstärken von selbst durch, wenn auf natürliche Weise, d. h. durch radioaktive Strahlung oder durch Höhenstrahlung, ein freibewegliches Startelektron gebildet wurde.

[0012] Die gezielte Überführung eines dynamischen Schalters in den leitenden Zustand findet vor dem Auftreten eines auf natürliche Weise entstandenen Startelektrons statt. Bevor die Funkenstrecke von selbst durchbricht werden zum Triggerzeitpunkt mittels Laserlicht Startelektronen erzeugt. Während der Vorentladungsdauer erfolgt der Lawinaufbau und die Streumaubreitung zwischen den Elektroden. Nach Ablauf der Vorentladungsdauer bricht die Spannung zwischen

den Elektroden zusammen und die Funkenstrecke ist im leitenden Zustand.

[0013] Im Gegensatz zu Gleichspannungsschaltern ist bei dynamisch beanspruchten Schaltern die Voraussetzung für die Ausbildung eines Entladungskanals ein Feldstärkewert über die statischen Durchbruchfeldstärke infolge der kurzzeitigen Überschreitung der statischen Durchbruchspannung bereits erfüllt. Es genügt daher eine vergleichsweise geringe Ladungsträgerdichte, im Idealfall ein einzelnes Startelektron, um die Funkenstrecke gezielt auszulösen. Dazu ist eine geringere Bestrahlungsstärke erforderlich als zur Erzeugung eines hochleitfähigen Plasmas mit hoher Ladungsträgerdichte.

[0014] Die aufzuwendenden Triggerlaserenergien liegen im Bereich von 1 mJ und die Bestrahlungsstärken bei wenigen MW/cm<sup>2</sup>. Eine Fokussierung des Laserstrahls ist nicht erforderlich. Bei einer Beleuchtung der Elektrodenoberfläche werden zusätzlich zu den im Gasvolumen entstandenen Ladungsträgern Elektronen durch Photoemission aus der Metalloberfläche bereitgestellt. Die aufzuwendende Triggerlaserenergie ist dann, ähnlich wie bei Gleichspannungsschaltern, niedriger als bei einer ausschließlichen Beleuchtung des Zwischenelektrodenraums.

[0015] Wird der Triggerlaserstrahl nicht fokussiert und parallel zu den Elektrodenoberflächen geführt, besteht die Möglichkeit, mehrere Entladungskanäle gleichzeitig auszulösen. Um möglichst viele Entladungskanäle zu erzeugen, sind daher langgestreckte und schienenförmig angeordnete Elektroden geometrien besonders geeignet. Derartig ausgeführte Mehrkanalschalter werden als Railgap-Funkenstrecken bezeichnet. Sie besitzen eine äußerst geringe Schalterimpedanz und wegen der vergleichsweise großen zu beanspruchenden Elektrodenoberfläche eine hohe Lebensdauer.

[0016] Railgap-Schalter mit einer Elektrodenlänge von 50 cm wurden von Taylor et. al. am National Research Council of Canada untersucht. Als Triggerlaser dienten ein KrF-Laser ( $\lambda = 248$  nm) und ein Stickstofflaser ( $\lambda = 337$  nm). Mit Ar/SF<sub>6</sub>- und N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>-Schaltgasgemischen und ohne optimierende Zusatzstoffe erfolgte die Auslösung der Funkenstrecke mit Laserenergien im Bereich von  $W = 20$  mJ.

[0017] Eine Verringerung der erforderlichen Triggerlaserenergie wurde durch die Beimischung von leicht photoionisierbaren Gasadditiven, wie Fluorbenzenen bei Verwendung des KrF-Lasers und Tri-n-Propylamin beim Einsatz des Stickstofflasers erzielt. Mit 1 mJ KrF-Laserstrahlung konnten so 70 - 100 Entladungskanäle pro Meter Elektrodenlänge erzielt werden. Die minimale Triggerenergie war  $W = 100$   $\mu$ J, die geringste Bestrahlungsstärke betrug  $I = 300$  kW/cm<sup>2</sup>. Bei der Triggerung mittels N<sub>2</sub>-Laser war der Energieaufwand  $W = 60$   $\mu$ J (siehe Taylor, R. S. et al.: "UV Radiation Triggered Rail-Gap Switches", Rev. of Scient. Instrum., Vol. 55, No. 2, 1984, p. 52 - 63). Die Bestrahlungsstärke lag hier jedoch

bei ca.  $I = 4$  MW/cm<sup>2</sup> und damit wesentlich höher als bei der Triggerung mit KrF-Strahlung.

[0018] W. Frey und A. J. Schwab berichteten auf dem Ninth International Symposium on High Voltage Engineering in Graz, Österreich, 28. Aug. - 1. Sep. 1995 über lasergetriggerte Rail-Gap-Funkenstrecken mit Startelektronen-Erzeugung durch Photoemission von Metall-Aerosol-Teilchen. Hierzu wird ein Laserstrahl geeigneter Wellenlänge und niedriger Laserenergie durch den Elektrodenzwischenraum der Funkenstrecke gelenkt. Der Innenraum der Funkenstrecke ist mit einem Gas, z. B. Ar, gefüllt, in dem Metall-Aerosol-Partikel verteilt sind. Das Laserlicht setzt durch Photoemission an den Aerosol-Partikeln Startelektronen frei, die unter geeigneten Bedingungen, wie Schaltgasdichte, Innern der Funkenstrecke und anfänglicher Potentialunterschied zwischen den Elektroden, den Kurzschluß zwischen den Elektroden initiieren. Wesentlich ist, daß der startelektronenerzeugende Laserstrahl durch den Elektrodenzwischenraum geht.

[0019] Der Bedarf an Licht- bzw. Laserenergie zur fehlerfreien Auslösung der Funkenstrecke ist hoch. Damit einher geht der Bedarf an Triggerlichtquellen mit höherer Energie, das sich insbesondere in den Kosten für das Triggerlichtsystem niederschlägt.

[0020] Daraus ergibt sich die Aufgabe, die der Erfindung zugrunde liegt, nämlich:

ein Verfahren für eine Schaltfunkenstrecke bereitzustellen, mit dem die Funkenstrecke zeitlich exakt mit möglichst geringer Laserenergie vom sperrenden in den leitenden Zustand übergeführt werden kann.

Weiter soll eine Schaltfunkenstrecke bereitgestellt werden, mit der sich das Verfahren zuverlässig durchführen läßt. Die Triggerlichtquelle soll energiearm sein.

Die Schaltfunkenstrecke soll als Schalter in einer Hochspannungsimpuls-Erzeugungsanlage eingesetzt werden können.

[0021] Die Aufgabe wird durch ein Verfahren gemäß Anspruch 1 und mit einer Schaltfunkenstrecke gemäß Anspruch 6 gelöst. Die Schaltfunkenstrecke wird gemäß Anspruch 13 als Gleichspannungsschalter oder als dynamisch beanspruchter Schalter verwendet.

[0022] In den Unteransprüchen 2 bis 5 sind vorteilhafte Verfahrensschritte gekennzeichnet. Die Unteransprüche 7 bis 12 kennzeichnen für die Ausführung vorteilhafte bauliche Maßnahmen.

[0023] Die zur Triggerung der Schaltfunkenstrecke notwendige Licht- bzw. Laserenergie ist gegenüber dem Stand der Technik sehr niedrig. Das Verfahren benötigt keine strahlfokussierenden Mittel wie Linsen und dazu notwendige Feinjustiereinrichtungen. Das Verfahren ist zur Optimierung bestehender Laserschaltsysteme ohne wesentliche Designänderung anwendbar. Besonders vorteilhaft ist die Optimierung des Schaltverhaltens von

Funkenstrecken mit gleichartigen, schienenförmigen Elektroden, also Mehrkanalschalter, den sog. Railgap-Funkenstrecken.

[0024] Im folgenden wird das Verfahren und die Schaltfunktstrecke und der Zeichnung näher erläutert. Es zeigt:

Figur 1 den prinzipiellen Aufbau der Schaltfunktstrecke,

Figur 2 den Aerosolgenerator im Prinzip,

Figur 3 die Zündverzugszeit der Railgap-Funkenstrecke,

Figur 4 die Standardabweichung der Zündverzugszeit (Jitter) der Railgap-Funkenstrecke,

Figur 5 die Selbstdurchbruchspannung der Funkenstrecke in Abhängigkeit der Aerosol-Partikel-Konzentration bei 2%  $\text{SF}_6$  in  $\text{Ar}$ ,

Figur 6 die Selbstdurchbruchspannung der Funkenstrecke in Abhängigkeit der Aerosol-Partikel-Konzentration bei 10%  $\text{SF}_6$  in  $\text{Ar}$ .

[0025] Die Schaltfunktstrecke 4 ist eine Rail-Gap-Funkenstrecke, die senkrecht zu der Achse der elektrischen Feldlinien und parallel zu den beiden Elektroden mit einem Stickstoff-Triggerlaser 9 beleuchtet wird. Das Aerosol ist ein Magnesium-Aerosol, dementsprechend ist mindestens eine der beiden Opferelektroden des Aerosolgenerators 1 aus Magnesium.

[0026] Entscheidend für die Anwendung der Metall-Aerosol-Triggermethode zur Optimierung des Schaltverhaltens bestehender Systeme ist, daß durch die Partikelbeimischung kein verfrühter Selbstdurchbruch der Laserschalter vor der Auslösung des Triggerlasers 9 auftritt.

[0027] Messungen der Selbstdurchbruchspannung der Railgap-Funkenstrecke 4 in Abhängigkeit von der Partikelkonzentration  $n_p$ , die proportional zur Funkenfrequenz  $f_k$  des Aerosolgenerators 1 ist, zeigen, daß das Selbstdurchbruchverhalten der Funkenstrecke 4 von der Partikelbeimischung nicht beeinflusst wird (Fig. 5 und 6). Durch die Anwendung von Metall-Aerosol-Schaltgasen wird das Triggerspannungsintervall nicht eingeschränkt.

[0028] Mit Mg-Partikeln im Schaltgas erfolgt eine fehlerfreie Triggerung der Funkenstrecke 4 bei Laserenergien von  $W = 200 \text{ nJ}$ . Bei dieser Triggerenergie ist die Schaltsteuerung geringer als ohne Partikelbeimischung und einer um Faktor 1000 höheren Laserenergie, Fig. 3, rechts.

[0029] Die Bestrahlungsstärke liegt bei der geringsten untersuchten Triggerlaserenergie bei  $I = 300 \text{ Wcm}^{-2}$  und ist damit um 4 Größenordnungen niedriger als bei bisherigen Ansätzen zur Verringerung der erforderlichen Triggerlaserenergie. Die erforderliche Laserenergie selbst ist um 3 Größenordnungen geringer.

[0030] Die Funktionsweise der Methode ist nicht an eine bestimmte Elektrodengeometrie der Funkenstrecke gebunden. Eine gezielte Auslösung eines dynamisch beanspruchten Laserschalters hängt in erster Linie davon ab, ob bei einer bestimmten Laserenergie Startelektronen erzeugt werden können. Dabei spielt der genutzte Startladungsträgerprozeß die maßgebliche Rolle und nicht die Elektrodengeometrie.

[0031] Die physikalische Grundlage der Metall-Aerosol-Triggermethode ist die hohe Quantenausbeute der Photoemission von Elektronen aus kleinen sphärischen Metallpartikeln in einer Gasatmosphäre. Sie liegt in der Größenordnung von  $Y > 10^{-4}$ . Bei einer Bestrahlung der Partikel mit Licht genügen somit  $N_{ph} = 10^4$  Photonen um ein freibewegliches Elektron zu erzeugen.

[0032] Als Ursache für die hohe Quantenausbeute wird die vernachlässigbare Rückstreuung von Elektronen am gestrichelten in Richtung der Partikeloberfläche mit anschließender Absorption des Elektrons angesehen. Eine Elektronenemission in Richtung der Flächennormalen besitzt die höchste Austrittswahrscheinlichkeit.

[0033] Die Metallpartikel 2 werden mit Hilfe des Aerosolgenerators 1 erzeugt, der nach dem Funkenerosionsprinzip arbeitet. Zur technischen Umsetzung der Triggermethode wird die Gaszuführung 3 der Schaltfunktstrecke 4 aufgetrennt und der Funkenerosionsgenerator 1 dazwischengeschaltet, Fig. 1. Diese Art der Aerosolzerzeugung und -beimischung ist für eine Dauerbetrieb des Laserschalters mit gleichbleibenden Schalteigenschaften geeignet. Mit anderen Methoden der Aerosolzerzeugung, wie beispielsweise der Drahtexplosionsmethode, kann eine Langzeitstabilität der Schalteigenschaften bei einem repetitiven Betrieb der Funkenstrecke nicht erreicht werden.

[0034] Im Funkenerosionsgenerator 1 entstehen die kugelförmigen Metallpartikel 2 infolge der Funkenentladungen zwischen den beiden Opferelektroden 7, Fig. 2. Die Entladung wird aus der Kapazität  $C_0$  gespeist und brennt repetitierend mit der Funkenfrequenz  $f_k$ . Im Lichtbogenfußpunkt wird Elektrodenmaterial aufgeschmolzen und in flüssiger Form in den Gasraum geschleudert, wo es kugelförmig erstarrt und vom Gasstrom 8 in die Schaltfunktstrecke 4 transportiert wird.

[0035] Die Opferelektroden 7 bestehen aus dem vorgegebenen Metall. Die Austrittsarbeit des Partikelmaterials  $W_A$  muß kleiner sein als die Photonenenergie der Triggerlaserstrahlung  $W_{ph}$ . Um eine Sedimentation der Partikel in der Funkenstrecke zu vermeiden, muß der Partikeldurchmesser kleiner als  $D_p = 500 \text{ nm}$  sein. Die erforderliche Partikelkonzentration liegt in der Größenordnung von  $n_p = 10^4 \text{ cm}^{-3}$ . Das wird mit einem Gasstrom von  $> 1 \text{ l/min}$  und mit Mg-Elektroden erreicht. Der Entladekreis des Aerosolgenerators ist so ausgelegt, daß die Speicherkapazität  $C_0 = 20 \text{ nF}$  ist, die Ladespannung 1 kV beträgt und die Repetierfrequenz mindestens

5 Hz ist.

[0036] Die Triggermethode wird an der Railgap-Funkenstrecke 4 eingesetzt und mit der Beimischung von Magnesiumpartikeln 2 untersucht. Die Austrittsarbeit von Magnesium beträgt  $W_A = 3,66$  eV. Die Photonenenergie des verwendeten  $N_2$ -Triggerlasers 9 ( $\lambda = 337$  nm) liegt mit  $W_{ph} = h\nu = 3,68$  eV leicht darüber. Der mittlere Magnesium-Partikeldurchmesser ist  $D_p = 100$  nm und die Partikelkonzentration im Schaltgas  $n_p > 10^4$  cm $^{-3}$ .

[0037] Zunächst wurde aus experimentellen Gründen mit einer Schaltgasgrundmischung von Argon und  $SF_6$  gearbeitet (Fig. 5 und 6). Prinzipiell aber ist der Einsatz eines Mischgases für die Funktion der Triggermethode nicht notwendig. Es kann auch ein einkomponentiges oder höherkomponentiges Schaltgas zum Betrieb der Schaltfunkenstrecke 4 verwendet werden.

[0038] Der geringe Energiebedarf zur Triggerrung der Funkenstrecke 4 mit Aerosolschaltgas wird bei der Messung der Zündverzugszeit der Funkenstrecke 4, der Zeitdauer vom Beginn des Laserimpulses bis zum Beginn des Spannungszusammenbruchs über der Funkenstrecke 4, in Abhängigkeit von der Triggerlaserenergie besonders deutlich, Fig. 3. Bei einer Grundgasmischung von 10 %  $SF_6$  in Argon, einem Gasdruck von  $p = 2$  bar $_{absolut}$  und ohne Mg-Partikelbeimischung findet bei einer Laserenergie von  $W = 20$   $\mu$ J nur noch sporadisch eine Lasertiggerung statt. In mehr als 50 % aller Triggerversuche bricht die Funkenstrecke 4 hier bei höheren Spannungswerten erheblich nach dem Lasereinstrahlzeitpunkt von selbst durch. Die Zündverzugszeit (Fig. 3) und die Schaltstreuung der Funkenstrecke 4 (Jitter) (Fig. 4) sind mit 145 ns bzw. 167 ns dementsprechend hoch.

#### Bezugszeichenliste

#### [0039]

- 1 Funkenerosionsgenerator, Aerosolgenerator
- 2 Metallpartikel
- 3 Gaszuleitung, Verbindungsleitung
- 4 Schaltfunkenstrecke, Railgap-Funkenstrecke, Funkenstrecke
- 5 Gaszuleitung, Zuleitung
- 6 Schaltgasversorgung
- 7 Elektroden, Opferelektroden
- 8 Gasstrom
- 9 Triggerlichtquelle, Triggerlaser,  $N_2$ -Triggerlaser

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Triggerrung einer gasisolierten und unter vorgegebenen Isoliergasdruck gestellten Schaltfunkenstrecke mit einer Lichtquelle, bestehend aus den Schritten
  - ein Funkenerosionsgenerator (1) wird in die Zu-

leitung (3) einer Isoliergaskomponente zur Schaltfunkenstrecke (4) eingebaut und unter vorgegebenen Druck gestellt,

im Funkenerosionsgenerator (1), in dem Funkenentladungen zwischen zwei Elektroden (7), den Opferelektroden, stattfinden und der mit einer vorgebbaren Repetierfrequenz betrieben wird, wird am Fußpunkt des durch die jeweilige Entladung erzeugten Funkenlichtbogens Elektrodenmaterial aufgeschmolzen und in flüssiger Form in den Zwischenraum der Opferelektroden (7) geschleudert, wo es zu kleinen kugelförmigen, in der durchströmenden Isoliergaskomponente nicht absinkenden, schwebefähigen Partikeln, Metall-Aerosol genannt, erstarrt, von dem Gasstrom mitgerissen und zur Schaltfunkenstrecke (4) transportiert wird, der Zwischenraum zwischen den Elektroden der Funkenstrecke wird zum Zwecke der Zündung mit einer Lichtquelle (9) vorbestimmter Wellenlänge, der Triggerlichtquelle, zumindest teilweise beleuchtet, wodurch die Startelektronen zum Aufbau mindestens eines Entladungskanals zwischen den Elektroden der Schaltfunkenstrecke (4) zum vorgegebenen Zeitpunkt über Photoemission aus den im Isoliergas vorhandenen Metall-Aerosol-Partikeln freigesetzt werden,

die Achse des Triggerlichtstrahls (9) wird zentral durch den Raum zwischen den Elektroden der Schaltfunkenstrecke (4) gelenkt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Schaltfunkenstrecke (4) ein einkomponentiges Isoliergas, wie  $SF_6$  oder  $N_2$ , oder ein mindestens zweikomponentiges Isoliergas, wie ein  $N_2$ /Ar-Gemisch oder Luft im einfachsten Fall, verwendet wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß als Isolier- oder Schaltgas eine Mischung aus 98 - 86 % Ar und komplementär dazu  $SF_6$  verwendet wird, und die nichtelektronenegative Gaskomponente Ar durch den Aerosolgenerator (1) strömt.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß als Triggerlichtquelle (9) eine inkohärente, zur Photoemission von Elektronen aus Aerosolpartikeln geeignete Lichtquelle verwendet wird.
5. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß als Triggerlichtquelle (9) ein Laser verwendet wird, der durch Photoemission aus Partikel des Isolier-

gas-aerosols Elektronen auslöst.

6. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach den Verfahrensansprüchen 1 bis 5, bestehend aus einer lichtgetriggerten Schaltfunkenstrecke, mit folgenden Merkmalen:

bei Quertriggenung geht die Achse des Lichtstrahls der Triggerlichtquelle (9) durch ein lichtdurchlässiges Fenster, wie Quarzglas, in der Wand der Schaltfunkenstrecke (4) und durch das Zentrum des Elektrodenzwischenraums oder

bei Längstriggenung durch ein solches Fenster in einer der beiden Elektroden,

dadurch gekennzeichnet, daß

ein Funkenerosionsgenerator (1) unmittelbar an eine Schaltgasversorgung (5) mit Druckreguliereinrichtungen angeschlossen und weiter über eine Druckgasleitung (3) an die Kammer der Schaltfunkenstrecke (4) gekoppelt ist,

in der Verbindungsleitung (3) zwischen dem Funkenerosionsgenerator (1) und der Funkenkammer der Schaltfunkenstrecke (4) mindestens eine weitere Zuleitung (5) für eine weitere Isoliergaskomponente ist, so daß ein mindestens einkomponentiges Isoliergas der Schaltfunkenstrecke (4) zugeführt werden kann,

mindestens eine der beiden Elektroden des Funkenerosionsgenerators (1) als Opferelektrode ausgebildet ist, welche die Quelle für das Metall-Aerosol ist, und aus einem leicht ablatierbaren, metallischen Material besteht oder damit beschichtet ist.

7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Elektroden der Schaltfunkenstrecke (4) derart gestaltet sind, daß im durchgeschalteten Zustand mindestens ein Lichtbogenkanal zwischen den beiden Elektroden besteht.

8. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Elektroden der Schaltfunkenstrecke (4) gleich, schalenförmig sind und parallel (Rail-Gap) zueinander liegen.

9. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Triggerlichtquelle (9) eine inkohärent strahlende Lichtquelle ist wie z. B. eine UV-Lichtquelle ist, deren Wellenlänge geringer als die langwellige Gren-

ze für Photoemission von Elektronen aus den Aerosolpartikel ist, und in vorgegebener Intensität abstrahlt.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Triggerlichtquelle (9) ein Laser wie z. B. ein Stickstofflaser ist.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Quelle für die Metallpartikel des Aerosols aus Magnesium oder Kupfer oder einem sonst leicht Metallpartikel spendenden Metall ist.

12. Vorrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Gaszuführung (3) am Funkenerosionsgenerator (1) unmittelbar am Zwischenraum der beiden Opferelektroden (7) mündet.

13. Verwendung der Schaltfunkenstrecke, die nach den Verfahrensansprüchen 1 bis 5 betrieben wird und gemäß den Vorrichtungsansprüchen 6 bis 12 aufgebaut ist, dadurch gekennzeichnet, daß die Schaltfunkenstrecke (4) als Gleichspannungsschalter oder als dynamisch beanspruchter Schalter verwendet wird.

#### Claims

1. Method of triggering a gas-insulated switching spark gap, which is subjected to a prescribed insulating gas pressure, by means of a light source, said method comprising the following steps:
  - a spark-erosion generator (1) is incorporated in the supply line (3) for supplying an insulating gas component to the switching spark gap (4) and is subjected to a prescribed pressure,
  - in the spark-erosion generator (1), in which there are spark discharges between two electrodes (7) - the disposable electrodes - and which generator is operated at a prescribable repeating frequency, electrode material is fused at the base of the spark arc, which is produced by the respective discharge, and centrifuged in liquid form into the intermediate space between the disposable electrodes (7), where said material solidifies to form small spherical, suspendable particles - called metal aerosol - which do not sink in the traversing insulating gas component, said material is entrained by the flow of gas and transported to the switching spark gap (4),
  - the intermediate space between the electrodes

of the spark gap is at least partially illuminated by a light source (9) of a predetermined wavelength - the triggering light source - for the purpose of ignition, whereby the starting electrons for forming at least one discharge channel between the electrodes of the switching spark gap (4) are released from the metal aerosol particles, present in the insulating gas, at the prescribed time via photoemission, and the axis of the triggering light beam (9) extend centrally through the space between the electrodes of the switching spark gap (4).

2. Method according to claim 1, characterised in that a one-component insulating gas, such as  $\text{SF}_6$  or  $\text{N}_2$ , or an insulating gas which has at least two components, such as an  $\text{N}_2/\text{Ar}$  mixture or air in the simplest case, is used in the switching spark gap (4).

3. Method according to claim 2, characterised in that a mixture of 98 - 86 % Ar and, complementary thereto,  $\text{SF}_6$  is used as the insulating or switching gas, and the gas component Ar, which is not electronegative, flows through the aerosol generator (1).

4. Method according to claim 3, characterised in that an incoherent light source, which is suitable for the photoemission of electrons from aerosol particles, is used as the triggering light source (9).

5. Method according to claim 3, characterised in that a laser is used as the triggering light source (9), which laser releases electrons from particles of the insulating gas aerosol by photoemission.

6. Apparatus for accomplishing the method according to the method claims 1 to 5, comprising a light-triggered switching spark gap and having the following features:

during transverse triggering, the axis of the light beam of the triggering light source (9) extends through a light-permeable window, such as quartz glass, in the wall of the switching spark gap (4) and through the centre of the intermediate space between the electrodes or,

during longitudinal triggering, said axis extends through such a window in one of the two electrodes,

characterised in that

a spark-erosion generator (1) communicates directly with a switching gas supply means (6) provided with pressure regulating arrangements and, moreover, is connected to the chamber of the switching spark gap (4) via a

gas pressure line (3),

there is at least one additional supply line (5) for an additional insulating gas component in the connection line (3) between the spark-erosion generator (1) and the spark chamber of the switching spark gap (4), so that an insulating gas, which has at least one component, can be supplied to the switching spark gap (4), and

at least one of the two electrodes of the spark-erosion generator (1) is configured as a disposable electrode, which is the source for the metal aerosol, and it is formed from an easily ablatable, metallic material or is coated therewith.

7. Apparatus according to claim 6, characterised in that the electrodes of the switching spark gap (4) are designed in such a manner that, in the connected position, there is at least one arc channel between the two electrodes.

8. Apparatus according to claim 7, characterised in that the two electrodes of the switching spark gap (4) are identical, rail-like, and lie parallel (rail gap) to each other.

9. Apparatus according to claim 8, characterised in that the triggering light source (9) is an incoherently radiating light source, such as a UV light source for example, the wavelength of which source is smaller than the long-wave limit for the photoemission of electrons from the aerosol particles, and it radiates in a prescribed intensity.

10. Apparatus according to claim 9, characterised in that the triggering light source (9) is a laser, such as a nitrogen laser for example.

11. Apparatus according to claim 10, characterised in that the source for the metal particles of the aerosol is from magnesium or copper or a metal which otherwise easily dispenses metal particles.

12. Apparatus according to claim 11, characterised in that the gas supply line (3) at the spark-erosion generator (1) terminates directly at the intermediate space between the two disposable electrodes (7).

13. Use of the switching spark gap which is operated according to the method claims 1 to 5 and formed according to the apparatus claims 6 to 12, characterised in that the switching spark gap (4) is used as a direct-voltage switch or as a dynamically loadable switch.



## Revendications

1. Procédé d'amorçage avec source lumineuse d'un éclateur de commutation isolé par un gaz et mis sous une pression gazeuse d'isolation prédéterminée, consistant en les séquences suivantes :

- un générateur d'érosion par étincelage (1) est monté dans la conduite d'amenée (3) d'un composant gazeux isolant allant à l'éclateur à étincelles de commutation (4) et est mis sous une pression prédéfinie,
- dans le générateur d'érosion par étincelage (1), dans lequel ont lieu des décharges par étincelles entre deux électrodes (7), des électrodes consommables, et que l'on fait fonctionner avec une fréquence répétitive que l'on peut prédéfinir, on fait fondre à la racine de l'arc électrique produit par la décharge correspondante la matière des électrodes et on la fait jaillir sous forme liquide dans l'espace intermédiaire compris entre les électrodes consommables (7), où elle se fige sous la forme de petites particules de forme sphérique, qui ne coulent pas dans le composant gazeux qui passe à travers, mais sont capables de rester en suspension, particules que l'on désigne sous le nom d'aérosol de métal, et où elles sont entraînées par le courant de gaz et transportées vers l'éclateur à étincelles de commutation (4),
- l'espace intermédiaire entre les électrodes de l'éclateur à étincelles est illuminé au moins en partie dans le but de provoquer l'allumage par une source de lumière (9) ayant une longueur d'onde prédéterminée, à savoir la source de lumière d'amorçage, grâce à quoi les électrons de démarrage sont libérés pour constituer au moins un canal de décharge entre les électrodes de l'éclateur à étincelles de commutation (4) à un instant prédéfini au moyen d'une émission photoélectrique à partir des particules de l'aérosol de métal existant dans le gaz isolant,
- l'axe du rayon de la lumière d'amorçage (9) est orienté au centre à travers l'espace compris entre les électrodes de l'éclateur à étincelles de commutation (4).

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que pour l'éclateur à étincelles de commutation (4) on utilise un gaz isolant à un seul composant, tel que  $\text{SF}_6$  ou  $\text{N}_2$  ou un gaz isolant à au moins deux composants, tel qu'un mélange  $\text{N}_2/\text{Ar}$  ou de l'air dans le cas le plus simple.

3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce qu'on utilise comme gaz isolant ou gaz de commuta-

tion un mélange composé de 98 à 99 % d'Ar et pour le reste de  $\text{SF}_6$ , et en ce que, le composant gazeux qui n'est pas électronégatif Ar s'écoule à travers le générateur d'aérosol (1).

4. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce qu'on utilise comme source de lumière d'amorçage (9) on utilise une source de lumière non cohérente, qui est appropriée à la photoémission d'électrons à partir des électrons provenant des particules d'aérosol.

5. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce qu'on utilise comme source de lumière d'amorçage (9) un laser, qui déclenche des électrons par la photoémission de particules du gaz constitué par l'aérosol isolant.

6. Dispositif pour la mise en oeuvre du procédé selon les revendications de procédé 1 à 5, consistant en un éclateur à étincelles de commutation amorcé par de la lumière, avec les particularités suivantes :

- lors de l'amorçage transversal l'axe du rayon de lumière de la source de lumière d'amorçage (9) passe à travers une fenêtre transparente, telle qu'un verre au quartz, dans la paroi de l'éclateur à étincelles de commutation (4) et à travers le centre de l'intervalle entre les électrodes, ou
- lors de l'amorçage longitudinal à travers une telle fenêtre dans l'une des deux électrodes,

caractérisé en ce qu'

- on raccorde un générateur d'érosion par étincelage (1) directement à une alimentation en gaz (5) avec des systèmes de régulation de la pression et on l'accouple ensuite par une conduite de gaz sous pression (3) à la chambre de l'éclateur à étincelles de commutation (4), au moins une autre liaison d'amenée (5) pour un autre composant gazeux d'isolation se trouvant dans la conduite de liaison (3) entre le générateur d'érosion par étincelage (1) et la chambre à étincelles (5), de telle sorte que l'on peut amener à l'éclateur à étincelles de commutation (4) au moins un gaz isolant formé d'un seul composant,
- au moins l'une des deux électrodes du générateur d'érosion par étincelage (1) est constituée sous la forme d'une électrode consommable, comme source de l'aérosol de métal, et consiste en une matière métallique facilement érodable, ou est revêtue de cette matière.

7. Dispositif selon la revendication 6,

caractérisé en ce que  
les électrodes de l'éclateur à étincelles de commutation (4) sont formées d'une façon telle qu'à l'état passant au moins un canal d'arc électrique subsiste entre les deux électrodes.

5

8. Dispositif selon la revendication 7,  
caractérisé en ce que  
les deux électrodes de l'éclateur à étincelles de commutation (4) sont identiques, en forme de rail et parallèles l'une à l'autre (Rail-Gap). 10
9. Dispositif selon la revendication 8,  
caractérisé en ce que  
la source de lumière d'amorçage (9) est une source de lumière qui rayonne d'une manière non cohérente telle que par exemple une lumière UV ultraviolette dont la longueur d'onde est plus faible que la longueur d'onde limite pour la photoémission d'électrons à partir des particules d'aérosol, et rayonne avec une intensité prédéfinie. 15 20
10. Dispositif selon la revendication 9,  
caractérisé en ce que  
la source de lumière d'amorçage (9) est un laser tel que par exemple un laser à azote. 25
11. Dispositif selon la revendication 10,  
caractérisé en ce que  
la source pour les particules métalliques de l'aérosol est du magnésium ou du cuivre ou un métal qui génère facilement des particules métalliques. 30
12. Dispositif selon la revendication 11,  
caractérisé en ce que  
la conduite d'amenée du gaz (3) débouche sur le générateur d'érosion par étincelage (1) directement dans l'intervalle des deux électrodes consommables (7). 35 40
13. Utilisation de l'éclateur à étincelles de commutation, que l'on fait fonctionner selon les revendications de procédé 1 à 5, et construit selon les revendications de dispositif 6 à 12,  
caractérisé en ce que  
l'éclateur à étincelles de commutation (4) est utilisé comme commutateur à tension continue ou comme commutateur sollicité dynamiquement. 45

50

55

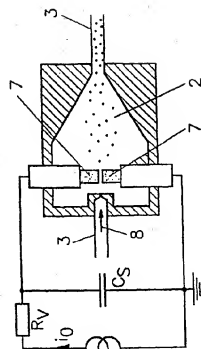
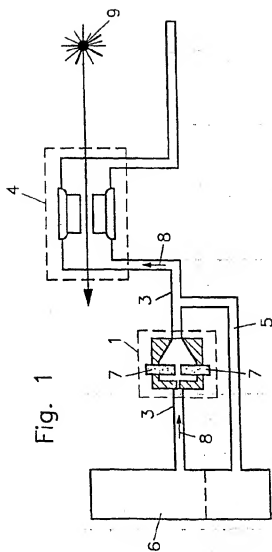


Fig. 3

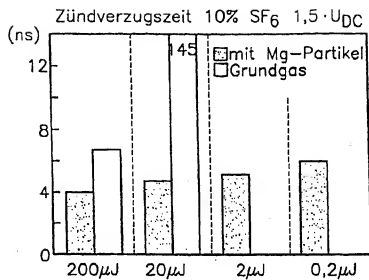


Fig. 4

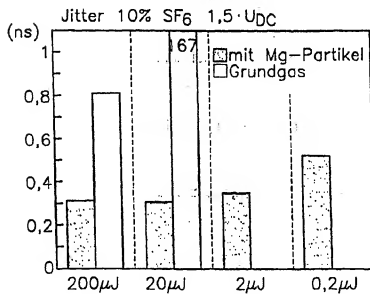


Fig. 5

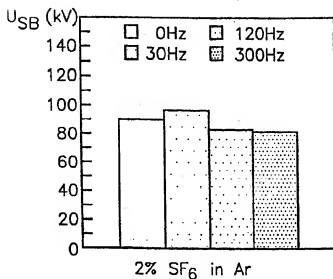


Fig. 6

